

Алгоритм траекторного сопровождения объектов пассивной системой позиционирования

В.К. Клочко¹, С.А. Смирнов¹

¹ Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

Аннотация

Предлагается алгоритм обнаружения и оценивания траекторных параметров движущихся в пространстве малоразмерных объектов системой позиционирования нескольких совмещённых оптических и сканирующих тепловых приёмников. Алгоритм основан на последовательной пространственной и временной обработках наблюдений. При пространственной обработке решается система уравнений, представляющая достаточное условие сопряжения векторов направлений на предполагаемые объекты в стереопарах, и находятся оценки координат и скорости в одном периоде наблюдения. При временной – распределяются векторы возможных направлений по принадлежности тем или иным объектам в последовательности периодов наблюдения. Приводятся результаты моделирования, показывающие преимущество предложенного алгоритма в сравнении с альтернативным алгоритмом, отражающим существующий подход к обнаружению и сопровождению объектов.

Ключевые слова: пассивная система позиционирования, обнаружение движущихся объектов, оценивание траекторных параметров.

Цитирование: Клочко, В.К. Алгоритм траекторного сопровождения объектов пассивной системой позиционирования / В.К. Клочко, С.А. Смирнов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 244-249. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-609.

Citation: Klochko VK, Smirnov SA. Object tracking algorithm for a passive positioning system. Computer Optics 2020; 44(2): 244-249. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-609.

Введение

В пассивных системах позиционирования, предназначенных для обнаружения и траекторного сопровождения малоразмерных движущихся в пространстве объектов [1], например, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), актуальна задача повышения точности определения пространственных координат и вероятности обнаружения объектов.

В последние годы удешевление производства БПЛА приводит к увеличению их количества и большей доступности как для профессионального, так и для личного использования. Небольшие БПЛА, летающие на малой высоте, являются серьезной угрозой при их несанкционированном проникновении на закрытые территории. Многочисленные случаи появления БПЛА в зонах безопасности аэропортов, над скоплением людей, в районах расположения военных объектов, а также использование их в противоправных целях делает задачу обнаружения и отслеживания особенно важной и широко обсуждаемой в научных кругах. Существуют различные системы для обнаружения малоразмерных целей, в том числе и БПЛА. Такие системы могут оснащаться акустическими [2, 3], радиолокационными [4, 5], телевизионными [6–9] и инфракрасными датчиками [10–12]. Использование одного единственного датчика не всегда позволяет обнаружить объект, поэтому широко используются системы с совмещением различных пассивных [13, 14] или активно/пассивных датчиков [15, 16].

Однако наиболее неуязвимыми являются чисто пассивные системы. Для известных отечественных и зарубежных пассивных систем, в том числе перечисленных, решение задачи оценивания пространственных координат точечных объектов основано на эффекте стереопары, которое математически сводится к решению системы алгебраических уравнений, например [17, 18]. В основном оно рассчитано на оптические системы, в которых изображения объектов в системе позиционирования нескольких приёмников-стереопар появляется одновременно. В системах совмещённых оптических и радиотепловых сканирующих приёмников [18] происходит временная задержка при определении направлений на объекты радиотепловыми приёмниками, что приводит к динамическим ошибкам, обусловленным движением объектов. Такие ошибки не учитываются в [17] и других подобных работах. Как следствие, понижаются точность определения пространственных координат и вероятность обнаружения объектов.

Для учёта динамических ошибок была предложена концепция пространственно-временной обработки наблюдений в системе пассивных сканирующих приёмников [18], которая получила реализацию в работе [19]. Однако алгоритм совместной пространственной и временной обработки в [19] оказался сложным, перегруженным многокритериальностью при определении оценок скорости по оценкам координат во времени. Данная работа улучшает результаты [19] разработкой алгоритма последовательной пространствен-

ной и временной обработок наблюдений с учётом оценок скорости.

Что касается идеи пространственно-временной обработки, то она давно известна под названием первичной и вторичной обработок, применяемых в классической радиолокации при обнаружении траекторий движения целей. Этот термин встречается и в современных работах, например [20].

Цель данной работы заключается в разработке алгоритма обнаружения и оценивания пространственных координат движущихся малоразмерных объектов пассивной системой позиционирования нескольких приёмников, независимо фиксирующих угловые направления на объекты.

Формализация и постановка задачи. Пассивная система позиционирования состоит из n оптических приёмников ($n \geq 2$), совмещённых с таким же количеством антенных радиотепловых приёмников. Приёмники распределены в пространстве и независимо наблюдают m малоразмерных движущихся объектов ($m \geq 1$). Обозначим: P_k – матрица поворота осей прямоугольной системы координат k -го приёмника по отношению к 1-му приёмнику; b_k – базовый вектор, соединяющий центры систем координат 1-го и k -го приёмников; N – число периодов наблюдения длительностью τ каждый; $a_k(i, j)$ – орт вектора направления на j -й объект ($j = 1, m$), зафиксированный в i -м периоде ($i = 1, N$) k -м приёмником ($k = 1, n$) в момент времени $t_k(i, j)$.

Совмещение оптических и радиотепловых сканирующих приёмников позволяет соединить преимущества высокого пространственного разрешения оптических приёмников и температурных характеристик наблюдаемых объектов в радиотепловых приёмниках.

Орт вектора направления на точечный объект (или центр тяжести изображения малоразмерного объекта) определяется в k -м оптическом приёмнике как:

$$a_k = (a_{x,k}, a_{y,k}, a_{z,k})^T = (-x_k, -y_k, f_k)^T / \mu_k, \quad (1)$$

$$\mu_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + f_k^2},$$

где x_k, y_k – координаты пикселя центра изображения объекта в матрице оптического приёмника; T – символ транспонирования; f_k – фокусное расстояние оптической линзы k -го приёмника.

В то же время орт a_k в угловых координатах угла места θ_k и азимута ϕ_k направления на объект в радиотепловом приёмнике, совмещённом с k -м оптическим приёмником, задан выражением:

$$a_k = (\cos \theta_k \sin \phi_k, \sin \theta_k, \cos \theta_k \cos \phi_k)^T, \quad (2)$$

где ϕ_k отсчитывается в горизонтальной плоскости от оси $O_k Z_k$, направленной в сторону объекта, а угол θ_k – в вертикальной плоскости относительно плоскости $O_k X_k Z_k$.

Из (1), (2) следует:

$$\phi_k = \arctg(a_x / a_z) = \arctg[-x_k / (f_k \mu_k)], \quad (3)$$

$$\theta_k = \arcsin(a_y) = \arcsin(-y_k / \mu_k).$$

Угловые координаты (3) передаются радиотепловому приёмнику для управления антенной в направлении ϕ_k, θ_k и, соответственно, получения температурной характеристики объекта.

Достаточное условие сопряжения $n-1$ пар векторов $a_1, a_k, k = 2, n$, направленных на один и тот же объект, в отдельном периоде наблюдения записывается в виде системы алгебраических уравнений в векторной форме:

$$r_1 a_1 - r_k P_k a_k + \Delta M_{1,k} - b_k = e_k, \quad k = \overline{2, n}, \quad (4)$$

где r_1 и r_k – наклонные дальности до объекта в системах 1-го и k -го приёмников; $\Delta M_{1,k}$ – вектор смещения координат объекта $M_1 = r_1 a_1$ в системе 1-го приёмника за время $\Delta t_{1,k} = t_k - t_1$ между моментами фиксации объекта в 1-м и k -м приёмниках; e_k – вектор ошибок сопряжения, обусловленных ошибками измерения координат ортов. Система уравнений (4) представляет собой уравнения связи координат векторов $M_1 = r_1 a_1$ и $M_k = r_k a_k$ направлений на объект и отличается наличием вектора смещения $\Delta M_{1,k}$, который с учётом вектора скорости $V_1 = (v_{1,x}, v_{1,y}, v_{1,z})^T$ или ускорения $V_1' = (v'_{1,x}, v'_{1,y}, v'_{1,z})^T$ движения объекта в системе координат 1-го приёмника определяется как $\Delta M_{1,k} = V_1 \Delta t_{1,k}$ или

$$\Delta M_{1,k} = V_1 \Delta t_{1,k} + V_1' (\Delta t_{1,k})^2 / 2, \quad \Delta t_{1,k} = t_k - t_1. \quad (5)$$

Без учёта смещения $\Delta M_{1,k}$ система (4) принимает вид

$$r_1 a_1 - r_k P_k a_k - b_k = e_k, \quad k = \overline{2, n}, \quad (6)$$

который обычно используется для взаимной ориентации систем координат или определения дальностей r_1 и r_k до объекта [17, 18].

Задача заключается в нахождении оценок \hat{m} числа объектов m , а также пространственных координат $M_1(i, j)$ и траекторных параметров $V_1(i, j)$ или $V_1'(i, j)$ движения j -х объектов ($j = 1, \hat{m}$) в последовательности i -х периодов ($i = 1, N$, N – число периодов), необходимых для дальнейшего управления траекторным сопровождением объектов.

Альтернативный алгоритм траекторного сопровождения

Данный алгоритм реализует последовательную пространственную и временную обработку наблюдений в системе двух приёмников ($n=2$) и отражает существующий подход, когда оценки скорости объектов определяются по найденным оценкам их положений.

Пространственная обработка наблюдений $a_k(i, j)$, $k = 1, n$, $j = 1, m$, осуществляется независимо в каждом i -м периоде ($i = 1, N$) и сводится к следующему.

1. Осуществляется перебор пар векторов $a_1(i, j_1)$ и $a_2(i, j_2)$, $j_1 = 1, m$, $j_2 = 1, m$. Для каждой пары векторов a_1 и a_2 (символы i, j_1, j_2 опускаем) решается система трёх уравнений (6) с двумя неизвестными в матричной форме, где $a_2' = P_2 a_2$:

$$AR - b_2 = e_2 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} a_{x,1} & -a'_{x,2} \\ a_{y,1} & -a'_{y,2} \\ a_{z,1} & -a'_{z,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{x,2} \\ b_{y,2} \\ b_{z,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{x,2} \\ e_{y,2} \\ e_{z,2} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Решением (7) по критерию минимума квадрата евклидовой нормы $\|e_2\|^2$ вектора ошибок сопряжения (метода наименьших квадратов) является вектор \hat{R} оценок дальностей r_1 и r_2 :

$$\hat{R} = (\hat{r}_1 \ \hat{r}_2)^T = (A^T A)^{-1} A^T b_2. \quad (8)$$

2. Находятся векторы пространственных координат:

$$M_1(i, j_1) = \hat{r}_1(i, j_1) a_1(i, j_1),$$

$$M_2(i, j_2) = \hat{r}_2(i, j_2) a_2(i, j_2)$$

для каждой j_1, j_2 -й пары, и вычисляется показатель J – индикатор ошибки сопряжения для данной пары в соответствии с (6) по формуле:

$$J = \|e_2\|^2 = (M_1 - P_2 M_2 - b_2)^T (M_1 - P_2 M_2 - b_2). \quad (9)$$

3. Величина J сравнивается с порогом допустимых ошибок β , выбираемым эмпирически, исходя из оценок качества работы алгоритма. При выполнении неравенства $J \leq \beta$ координаты вектора $M_1(i, j_1)$ переписываются в новой j -й нумерации в вектор $M(i, j)$, $j = 1, m_i$, координат предполагаемого объекта в системе 1-го приёмника, где m_i – количество таких векторов, образованных в i -м периоде. Число m_i даёт первичную оценку числа объектов наблюдения в i -м периоде, а вектор $M(i, j)$ – первичные оценки пространственных координат j -го объекта.

Временная обработка векторов $M(i, j)$, $j = \overline{1, m_i}$, $i = \overline{1, N}$, осуществляется в последовательности i -х периодов следующим образом.

1. В первых двух периодах ($i = 1, 2$) перебором пар векторов $M(1, j_1)$ и $M(2, j_2)$, $j_1 = 1, m_1$, $j_2 = 1, m_2$ определяются и запоминаются для каждой j_1, j_2 -й пары начальные оценки параметров траекторий предполагаемых объектов – пространственного положения \hat{M}_s и скорости \hat{V}_s в новой s -й нумерации:

$$\hat{M}_s = M(1, j_1), \quad \hat{V}_s = (M(2, j_2) - M(1, j_1)) / \Delta t_{1,2},$$

$$\Delta t_{1,2} = t(2, j_2) - t(1, j_1),$$

где $s = 1, n_2$, n_2 – число вариантов соединения векторов (групп), образованных во втором периоде ($n_2 = m_1 m_2$). Устанавливается начальное значение показателя s -й группы $J_s = 0$, $s = 1, n_2$. Запоминаются номера векторов, вошедших в состав s -х групп, по ко-

торым в дальнейшем восстанавливаются моменты времени их образования.

3. В третьем и последующих периодах ($i = \overline{1, N}$) векторы $M(i, j)$, $j = 1, m_i$, найденные в i -м периоде на этапе пространственной обработки, ставятся в соответствие s -й группе векторов, образованных в предыдущем ($i-1$)-м периоде ($s = 1, n_{i-1}$). На основе оценок параметров траектории s -й группы вычисляется вектор экстраполированных координат на момент времени $t(i, j)$ формирования $M(i, j)$: $M_s^{\partial} = \hat{M}_s + \hat{V}_s \Delta t$, где Δt – временной шаг экстраполяции, определяемый с учётом $t(i, j)$ и запомненным ранее моментом образования s -й группы.

4. Если невязка – норма разности векторов $\Delta J = \|M(i, j) - M_s^{\partial}\|$ не превышает величины допустимого отклонения β , то вектор $M(i, j)$ включается в состав s -й группы, которая получает новую k -ю нумерацию: $k = 1, n_i$, где n_i – число новых продолжений групп, полученных в i -м периоде. Для каждой вновь образованной k -й группы вычисляется показатель группы $J_k = J_s + \Delta J$ в виде суммы (по числу периодов) невязок. Запоминаются номера векторов, вошедших в состав k -й группы, и вычисляются оценки траекторных параметров M_k и \hat{V}_k этой группы по всем векторам, вошедшим в состав группы с учётом моментов времени их образования. Все данные запоминаются в порядке возрастания показателей J_k , $k = 1, n_i$.

5. По окончании N -го периода из всего массива групп последовательно выделяются \hat{m} групп с наименьшими значениями показателей J_k и не имеющими общих присоединённых к группам векторов (допускается малое количество пересечений). Траекторные параметры выделенных групп передаются на траекторное сопровождение \hat{m} обнаруженных объектов.

В таком виде пространственная обработка сопровождается динамическими ошибками из-за неучтённых смещений $\Delta M_{1,2}$ вектора $M_1(i, j_1)$ за время $\Delta t_{1,2} = t(i, j_2) - t(i, j_1)$. Неучтённые динамические ошибки сопряжения передаются на этап временной обработки. Для преодоления данного недостатка предлагается следующий алгоритм.

Алгоритм траекторного сопровождения

Данный алгоритм также реализует последовательную пространственную и временную обработку наблюдений, но в системе трёх приёмников ($n=3$) и с учётом оценок скорости. Пространственная обработка наблюдений $a_k(i, j)$, $k = 1, n$, $j = 1, m$, осуществляется в каждом i -м периоде ($i = 1, N$) и сводится к следующему.

1. Осуществляется перебор троек векторов $a_1(i, j_1)$, $a_2(i, j_2)$, $a_3(i, j_3)$, $j_1 = 1, m$, $j_2 = 1, m$, $j_3 = 1, m$. Для каждой тройки векторов a_1 , a_2 , a_3 (символы i, j_1, j_2, j_3 опускаем) решается система шести уравнений (4) с шестью неизвестными в матричной форме с учётом смещения $\Delta M_{1,k} = V_1 \Delta t_{1,k}$:

$$AX - B = E, \quad (10)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} a_{x,1} & -a'_{x,2} & 0 & \Delta t_2 & 0 & 0 \\ a_{y,1} & -a'_{y,2} & 0 & 0 & \Delta t_2 & 0 \\ a_{z,1} & -a'_{z,2} & 0 & 0 & 0 & \Delta t_2 \\ a_{x,1} & 0 & -a'_{x,3} & \Delta t_3 & 0 & 0 \\ a_{y,1} & 0 & -a'_{y,3} & 0 & \Delta t_3 & 0 \\ a_{z,1} & 0 & -a'_{z,3} & 0 & 0 & \Delta t_3 \end{bmatrix},$$

$$a'_2 = P_2 a_2, \quad a'_3 = P_3 a_3,$$

$$X = (r_1 \ r_2 \ r_3 \ v_{x,1} \ v_{y,1} \ v_{z,1})^T,$$

$$B = (b_{x,2} \ b_{y,2} \ b_{z,2} \ b_{x,3} \ b_{y,3} \ b_{z,3})^T,$$

$$E = (e_{x,2} \ e_{y,2} \ e_{z,2} \ e_{x,3} \ e_{y,3} \ e_{z,3})^T,$$

$$\Delta t_2 = t(i, j_2) - t(i, j_1), \quad \Delta t_3 = t(i, j_3) - t(i, j_1).$$

Решением (10) по критерию минимума квадрата евклидовой нормы $J = \|E\|^2 = (AX - B)^T(AX - B)$ вектора ошибок сопряжения является вектор оценок

$$\begin{aligned} \hat{X} &= (\hat{r}_1 \ \hat{r}_2 \ \hat{r}_3 \ \hat{v}_{x,1} \ \hat{v}_{y,1} \ \hat{v}_{z,1})^T = \\ &= (A^T A)^{-1} A^T B = A^{-1} B, \end{aligned} \quad (11)$$

или в случае плохо обусловленной матрицы A : $\hat{X} = A^+ B$, где A^+ – псевдообратная матрица.

Из состава вектора оценок \hat{X} берутся составляющие вектора скорости: $V_1 = (\hat{v}_{x,1}, \hat{v}_{y,1}, \hat{v}_{z,1})^T$. Для получения оценки дальности \hat{r}_1 используется более устойчивый к обращению матрицы алгоритм (7), (8) для двух приёмников ($n=2$), основанный на решении системы трёх уравнений $r_1 a_1 - r_2 P_2 a_2 + \Delta M_{1,2} - b_2 = e_2$ путём замены вектора b_2 на $\hat{B}_2 = b_2 - \Delta \hat{M}_{1,2} = b_2 - \hat{V}_1 \Delta t_2$:

$$\begin{aligned} AR - \hat{B}_2 &= e_2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \begin{bmatrix} a_{x,1} & -a'_{x,2} \\ a_{y,1} & -a'_{y,2} \\ a_{z,1} & -a'_{z,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{x,2} - \hat{v}_{x,1} \Delta t_2 \\ b_{y,2} - \hat{v}_{y,1} \Delta t_2 \\ b_{z,2} - \hat{v}_{z,1} \Delta t_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e_{x,2} \\ e_{y,2} \\ e_{z,2} \end{bmatrix} \Rightarrow \\ \Rightarrow \hat{R} &= (\hat{r}_1 \ \hat{r}_2)^T = (A^T A)^{-1} A^T \hat{B}_2. \end{aligned}$$

2. Запоминаются векторы оценок пространственных координат в системе 1-го приёмника в j -й нумерации, найденные с учётом перемещения объектов за время наблюдения:

$$M(i, j) = \hat{r}_1(i, j) a_1(i, j_1), \quad j = \overline{1, m_i}, \quad m_i = m^3,$$

и векторы оценок скорости изменения координат $V_1(i, j)$, $j = \overline{1, m_i}$, которые используются на этапе временной обработки. В отличие от показателя (9) показатель $J = \|E\|^2 = (AX - B)^T(AX - B)$ оценок (11) для любого варианта троек векторов $a_1(i, j_1)$, $a_2(i, j_2)$, $a_3(i, j_3)$ близок к нулю, поэтому сброс ложных троек осуществляется на последующем этапе временной обработки, который сводится к следующему.

1. В первом периоде ($i=1$) фиксируются начальные оценки положения $\hat{M}_s = M(1, j)$ и скорости

$\hat{V}_s = V_1(1, j)$, $j = \overline{1, n_1}$. Устанавливается начальное значение показателя s -й группы $J_s = 0$, $s = \overline{1, n_1}$.

2. Во втором и последующих периодах ($i = \overline{2, N}$) векторы $M(i, j)$, $j = \overline{1, m_i}$, найденные в i -м периоде на этапе пространственной обработки, ставятся в соответствие s -й группе векторов, образованных в предыдущем $(i-1)$ -м периоде. Вычисляется вектор экстраполированных координат на момент времени $t(i, j)$ формирования $M(i, j)$: $\hat{M}_s^{\partial} = \hat{M}_s + \hat{V}_s \Delta t$, где Δt – временной шаг экстраполяции.

3. Если невязка $\Delta J = \|M(i, j) - \hat{M}_s^{\partial}\|$ не превышает величины допустимого отклонения β , то вектор $M(i, j)$ включается в состав s -й группы, которая получает новую k -ю нумерацию: $k = \overline{1, n_i}$, где n_i – число новых продолжений групп, полученных в i -м периоде. Для каждой вновь образованной k -й группы вычисляется суммарный (по числу периодов) показатель группы $J_k = J_s + \Delta J$. Запоминаются номера векторов, вошедших в состав k -й группы, и оценки траекторных параметров $\hat{M}_k = M(i, j)$ и $\hat{V}_k = V_1(i, j)$. Все данные запоминаются в порядке возрастания показателей J_k , $k = \overline{1, n_i}$.

4. По окончании N -го периода из всего массива групп последовательно выделяются \hat{m} групп с наименьшими значениями показателей J_k и не имеющими общих присоединённых к группам векторов (допускается малое количество пересечений). Траекторные параметры выделенных групп передаются на траекторное сопровождение \hat{m} обнаруженных объектов.

В таком виде осуществляется последовательная пространственная и временная обработки наблюдений в системе трёх приёмников. Пространственная обработка позволяет найти оценки пространственных координат и скорости их изменения, а временная обработка – сбросить ложные группы векторов.

Результаты моделирования

Работа алгоритмов проверялась на линейных моделях траекторий движения нескольких БПЛА. Приёмники общим числом $n=2$ и $n=3$ располагались на дуге окружности с ортогональным положением линий визирования и принимали информацию об ортах направлений на движущиеся по близким траекториям БПЛА с временной задержкой Δt_2 и Δt_3 . Наблюдения осуществлялись в последовательности $N=5$ периодов, каждый длительностью $\tau=1$ с, и на малой дальности порядка 100–200 м. На множестве реализаций эксперимента вычислялись следующие показатели качества работы алгоритмов: d_{cp} – среднее расстояние между найденным положением объекта в N -м периоде и моделируемым положением (как норма разности векторов) и σ_d – среднее квадратическое отклонение (СКО) расстояния d ; $P_{гм}$ – оценка вероятности обнаружения всех m объектов, вычисляемая на множестве реализаций путём идентификации моделируемых и найденных траекторий по критерию близости поло-

жений моделируемых и обнаруженных объектов в последнем периоде наблюдения.

В табл. 1 представлены указанные характеристики, полученные для альтернативного алгоритма в зависимости от числа объектов m и временной задержки Δt при СКО $\sigma_x = 0,1$ м ошибки измерения отдельной координаты вектора $M(i, j)$, распределённой по нормальному закону с нулевым средним.

В табл. 2 представлены характеристики, полученные для предложенного алгоритма в зависимости от числа объектов m и временных задержек Δt_2 и Δt_3 .

Табл. 1. Моделирование альтернативного алгоритма

	$m = 1$		$m = 2$	
Δt	0,1	0,25	0,10	0,25
d_{cp}/σ_d	1,25/0,89	3,10/2,30	1,28/1,03	3,30/2,40
Pr_m	1,00	0,71	0,97	0,60

Табл. 2. Моделирование предложенного алгоритма

	$m = 1$		$m = 2$	
$\Delta t_2 / \Delta t_3$	0,1/0,2	0,3/0,4	0,1/0,2	0,3/0,4
d_{cp}/σ_d	0,15/0,07	0,15/0,07	0,37/0,95	0,55/1,34
Pr_m	1	1	0,96	0,95

Из сравнения данных двух таблиц следует вывод об очевидном преимуществе второго алгоритма, учитывающего скорость изменения координат при вычислении оценок положения.

Аналитическое исследование точности оценок дальностей

Точность оценок $\hat{R} = (\hat{r}_1, \hat{r}_k)^T$ в (8) для некоррелированных координат вектора e_2 характеризуется ковариационной матрицей $K_{\Delta R}$ ошибок оценивания $\Delta R = \hat{R} - R$ вида: $K_{\Delta R} = \sigma_e^2 (A^T A)^{-1}$, где σ_e^2 – дисперсия отдельной координаты вектора e^2 . С учётом того, что скалярное произведение ортов равняется косинусу угла между ними, выражение матрицы $K_{\Delta R}$ для двух приёмников ($n=2$) раскрывается следующим образом:

$$K_{\Delta R} = \frac{\sigma_e^2}{\sin^2 \alpha} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha \\ \cos \alpha & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где α – угол между векторами a_1 и a_2 направлений на объект.

Так как главная диагональ матрицы (12) содержит дисперсии ошибок Δr_1 и Δr_2 оценок дальностей \hat{R} , то СКО ошибки оценивания дальности в первом приёмнике определится как $\sigma[\Delta r_1] = \sigma_e / |\sin \alpha|$.

Отсюда следует, что наименьшая ошибка определения дальности $\sigma_{\min} = \sigma_e$ достигается при $\alpha = 90^\circ$, то есть при ортогональном взаимном положении векторов a_1 и a_k . Это даёт рекомендацию для управления наблюдением: взаимное положение приёмников в стереопарах должно обеспечивать направления на объект, близкие к ортогональному.

При оценивании дальностей в системе трёх при-

ёмников ($n=3$) без оценок скорости ковариационная матрица вектора ошибок $\Delta R = (\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3)^T$:

$$K_{\Delta R} = \frac{\sigma_e^2}{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha & \cos \beta \\ \cos \alpha & 1 + \sin^2 \beta & \cos \alpha \cos \beta \\ \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & 1 + \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где α и β – углы между векторами a_1, a_2 и a_1, a_3 . Из (13) получаем СКО ошибки определения дальности в первом приёмнике: $\sigma[\Delta r_1] = \sigma_e / \sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta}$.

В сравнении с $n=2$ при $\alpha = \beta = 90^\circ$ погрешность при $n=3$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Увеличение числа приёмников ($n>3$) приводит к дальнейшему уменьшению погрешности. При этом в алгоритмах меняется только размерность используемых матриц.

Заключение

Предложен алгоритм траекторного сопровождения объектов в трёхмерном пространстве, основанный на последовательной пространственной и временной обработке наблюдений в пассивной системе позиционирования двух и трёх ($n=2, 3$) совмещённых оптических и радиотепловых приёмников.

Данный алгоритм сравнивается с альтернативным алгоритмом, отражающим существующий подход к обнаружению и траекторному сопровождению объектов без учёта временных задержек формирования векторов направлений на объекты в приёмниках стереопар. Предлагаемый алгоритм реализует новое положение, основанное на учёте временных задержек в системе наблюдения, что приводит к заметному повышению точности определения положения объектов и вероятности обнаружения всех объектов.

Аналитическое исследование точности оценок дальности даёт рекомендацию взаимного расположения стереопар приёмников, обеспечивающего ортогональность направлений на объект при управлении наблюдением.

Предложенные алгоритмы могут быть использованы в существующих оптических и радиотепловых пассивных системах позиционирования, предназначенных для наблюдения за движущимися объектами.

Благодарности

Публикация подготовлена в рамках выполнения научных исследований, осуществляемых ФГБОУ ВО «РГРТУ» в соответствии с государственным контрактом 2.7064.2017/БЧ.

Литература

1. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов / под ред. Р.П. Быстрова, А.В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2008. – 320 с.
2. Case, E.E. Low-cost acoustic array for small UAV detection and tracking / E.E. Case, A.M. Zelnio, B.D. Rigling // 2008

- IEEE National Aerospace and Electronics Conference. – 2008. – P. 110-113. – DOI: 10.1109/NAECON.2008.4806528.
3. **Busset, J.** Detection and tracking of drones using advanced acoustic cameras / J. Busset, [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9647. – 96470F. – DOI: 10.1117/12.2194309.
4. **Moses, A.** Radar-based detection and identification for miniature air vehicles / A. Moses, M.J. Rutherford, K.P. Valavanis // 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA). – 2011. – P. 933-940. – DOI: 10.1109/CCA.2011.6044363.
5. **Hoffmann, F.** Micro-doppler based detection and tracking of UAVs with multistatic radar / F. Hoffmann, [et al.] // 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf). – 2016. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/RADAR.2016.7485236.
6. **Kovács, L.** Visual real-time detection, recognition and tracking of ground and airborne targets / L. Kovács, C. Benedek // Proceedings of SPIE. – 2011. – Vol. 7873. – 787311. – DOI: 10.1117/12.872314.
7. **Muraviev, V.S.** Aerial vehicles detection and recognition for UAV vision system / V.S. Muraviev, S.A. Smirnov, V.V. Strotov // Computer Optics. – 2017. – Vol. 41(4). – P. 545-551. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-545-551.
8. **Katulev, A.** Adaptive method and algorithm for detecting low-contrast objects with an optoelectronic device / A. Katulev, A. Kolonskov, A. Khramichev, S. Yagol'nikov // Journal of Optical Technology. – 2014. – Vol. 81, Issue 2. – P. 75-82. – DOI: 10.1364/JOT.81.000075.
9. **Муравьев, В.С.** Адаптивный алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов на изображениях / В.С. Муравьев, С.И. Муравьев // Информационно-управляющие системы. – 2011. – № 5. – С. 8-13.
10. **Deshpande, S.D.** Max-mean and max-median filters for detection of small targets / S.D. Deshpande, [et al.] // Proceedings of SPIE. – 1999. – Vol. 3809. – P. 74-84. – DOI: 10.1117/12.364049.
11. **Wang, P.** Infrared small target detection using directional highpass filters based on LS-SVM / P. Wang, J.W. Tian, C.Q. Gao // Electronics Letters. – 2009. – Vol. 45, Issue 3. – P. 156-158. – DOI: 10.1049/el:20092206.
12. **Srivastava, H.B.** Image pre-processing algorithms for detection of small/point airborne targets / H.B. Srivastava // Defence Science Journal. – 2009. – Vol. 59, Issue 2. – P. 166-174. – DOI: 10.14429/dsj.59.1505.
13. **Laurenzis, M.** Multi-sensor field trials for detection and tracking of multiple small unmanned aerial vehicles flying at low altitude / M. Laurenzis, S. Hengy, A. Hommes, [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10200. – 102001A. – DOI: 10.1117/12.2261930.
14. **Müller, T.** Robust drone detection for day/night counter-UAV with static VIS and SWIR cameras / T. Müller // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10190. – 1019018. – DOI: 10.1117/12.2262575.
15. **Kim, B.** V-RBNN based small drone detection in augmented datasets for 3D LADAR system / B. Kim, [et al.] // Sensors. – 2018. – Vol. 18, Issue 11. – 3825. – DOI: 10.3390/s18113825.
16. **Hammer, M.** UAV detection, tracking, and classification by sensor fusion of a 360° lidar system and an alignable classification sensor / M. Hammer, [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2019. – Vol. 11005. – 110050E. – DOI: 10.1117/12.2518427.
17. Цифровая обработка изображений в информационных системах : учеб. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук [и др.]. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
18. **Klochko, V.K.** Space-time processing of object images in passive radio systems / V.K. Klochko, S.M. Gudkov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018. – Vol. 54, No. 4. – P. 348-354. – DOI: 10.3103/S8756699018040052.
19. **Klochko, V.K.** Detection of moving objects by a passive scanning system / V.K. Klochko // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2019. – Vol. 55, Issue 1. – P. 59-65. – DOI: 10.3103/S8756699019010102.
20. **Razin'kov, S.N.** Performance in the primary and secondary processing of pulsed radio signals in passive radar systems / S.N. Razin'kov, A.A. Sirota // Measurement Techniques. – 2004. – Vol. 47, Issue 2. – P. 193-198. – DOI: 10.1023/B:METE.0000026221.30211.d8.

Сведения об авторах

Клочко Владимир Константинович, 1950 года рождения, в 1972 году окончил Рязанский радиотехнический институт. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию, докторскую диссертацию в 2006 г. Профессор кафедры автоматизации и информационных технологий в управлении (АИТУ) Рязанского государственного радиотехнического университета (РГТРУ). Область научных интересов: математические методы формирования, восстановления и обработки трехмерных изображений объектов в оптико-электронных, радиометрических и радиолокационных системах, обнаружение и траекторное сопровождение группы объектов.
E-mail: klochkovk@mail.ru.

Смирнов Сергей Александрович, 1986 года рождения, в 2008 году окончил Рязанский государственный радиотехнический университет, защитил кандидатскую диссертацию в 2015 г. Доцент кафедры АИТУ РГТРУ. Область научных интересов: обработка изображений, распознавание образов и системы управления.
E-mail: smirnov.s.a@rsreu.ru.

ГРНТИ: 28.00.00

Поступила в редакцию 22 июля 2019 г. Окончательный вариант – 11 октября 2019 г.

Object tracking algorithm for a passive positioning system

V.K. Klochko¹, S.A. Smirnov¹

¹ Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

Abstract

We propose an algorithm for small-sized mobile object detection and trajectory parameter estimation for a passive positioning system that consists of several optical, thermal, and radio sensors. The algorithm is based on a combination of spatial and temporal processing of observation data. For spatial processing, a set of equations is solved that defines the sufficient condition for coupling the direction vectors to probable objects in the image stereo pair. Object coordinates and velocities for a single observation period are estimated. For temporal processing, the direction vectors are distributed based on connection to probable objects in a sequence of the capture intervals. The results of numerical modeling of the proposed algorithm show the advantage of combining the two approaches in comparison with the traditional object detection and tracking algorithms.

Keywords: passive positioning system, object detection, trajectory parameters estimation

Citation: Klochko VK, Smirnov SA. Object tracking algorithm for a passive positioning system. *Computer Optics* 2020; 44(2): 244-249. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-609.

Acknowledgements: This publication has been prepared as a part of research carried out by Ryazan State Radio Engineering University under the state contract 2.7064.2017/BCh.

References

- [1] Bystrov RP, Sokolov AV. Passive radar: Object detection methods [In Russian]. Moscow: "Radiotekhnika" Publisher, 2008.
- [2] Case EE, Zelnio AM, Rigling BD. Low-cost acoustic array for small UAV detection and tracking. *IEEE National Aerospace and Electronics Conference* 2008: 110-113. DOI: 10.1109/NAECON.2008.4806528.
- [3] Busset J, et al. Detection and tracking of drones using advanced acoustic cameras. *Proc SPIE* 2015; 9647: 96470F. DOI: 10.1117/12.2194309.
- [4] Moses A, Rutherford MJ, Valavanis KP. Radar-based detection and identification for miniature air vehicles. *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)* 2011: 933-940. DOI: 10.1109/CCA.2011.6044363.
- [5] Hoffmann F, et al. Micro-doppler based detection and tracking of UAVs with multistatic radar. *IEEE Radar Conference (RadarConf)* 2016: 1-6. DOI: 10.1109/RADAR.2016.7485236.
- [6] Kovács L, Benedek C. Visual real-time detection, recognition and tracking of ground and airborne targets. *Proc SPIE* 2011; 7873: 787311. DOI: 10.1117/12.872314.
- [7] Muraviev VS, Smirnov SA, Strotov VV. Aerial vehicles detection and recognition for UAV vision system. *Computer Optics* 2017; 41(4): 545-551. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-545-551.
- [8] Katulev A, Kolonskov A, Khramichev A, Yagol'nikov S. Adaptive method and algorithm for detecting low-contrast objects with an optoelectronic device. *J Opt Technol* 2014; 81(2): 75-82. DOI: 10.1364/JOT.81.000075.
- [9] Muraviev VS, Muraviev SI. Adaptive algorithm for the selection and detection of air objects in images [In Russian]. *Information and Control* 2011; 5: 8-13.
- [10] Deshpande SD, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small targets. *Proc SPIE* 1999; 3809: 74-84. DOI: 10.1117/12.364049.
- [11] Wang P, Tian JW, Gao CQ. Infrared small target detection using directional highpass filters based on LS-SVM. *Electron Lett* 2009; 45(3): 156-158. DOI: 10.1049/el:20092206.
- [12] Srivastava HB. Image pre-processing algorithms for detection of small/point airborne targets. *Defence Science Journal* 2009; 59(2): 166-174. DOI: 10.14429/dsj.59.1505.
- [13] Laurenzis M, Hengy S, Hommes A, et al. Multi-sensor field trials for detection and tracking of multiple small unmanned aerial vehicles flying at low altitude. *Proc SPIE* 2017; 10200: 102001A. DOI: 10.1117/12.2261930.
- [14] Müller T. Robust drone detection for day/night counter-UAV with static VIS and SWIR cameras. *Proc SPIE* 2017; 10190: 1019018. DOI: 10.1117/12.2262575.
- [15] Kim B, et al. V-RBNN based small drone detection in augmented datasets for 3D LADAR system. *Sensors* 2018; 18(11): 3825. DOI: 10.3390/s18113825.
- [16] Hammer M, et al. UAV detection, tracking, and classification by sensor fusion of a 360° lidar system and an alignable classification sensor. *Proc SPIE* 2019; 11005: – 110050E. DOI: 10.1117/12.2518427.
- [17] Gruzman IS, Kirichuk VS, et al. Digital image processing in information systems [In Russian]. Novosibirsk: "Izd. NGTU" Publisher; 2002.
- [18] Klochko VK, Gudkov SM. Space-time processing of object images in passive radio systems. *Optoelectron Instrument Proc* 2018; 54(4): 348-354. DOI: 10.3103/S8756699018040052.
- [19] Klochko VK. Detection of moving objects by a passive scanning system. *Optoelectron Instrument Proc* 2019; 55(1): 59-65. DOI: 10.3103/S8756699019010102.
- [20] Razin'kov SN, Sirota AA. Performance in the primary and secondary processing of pulsed radio signals in passive radar systems. *Measurement Techniques* 2004; 47(2): 193-198. DOI: 10.1023/B:METE.0000026221.30211.d8.

Authors' information

Vladimir Konstantinovich Klochko, (b. 1950), received candidate and doctor of Technical Science degree from Ryazan State Radio Engineering University (RSREU) in 1983 and 2006, respectively. Currently he works as the profes-

sor of Automation and Information Technologies in Control department (AITC) of RSREU. His research interests are mathematical methods formation, restoration and processing of three-dimensional images of objects in optical-electronic, radiometric and radar systems, detection and tracking of a group of objects. E-mail: klochkovk@mail.ru.

Sergey Aleksandrovich Smirnov (b. 1986) received engineer qualification in Automation and Control Systems, candidate of Technical Science degree from RSREU in 2008 and 2015, respectively. Currently he works as the associated professor in the AITC department of RSREU. His research interests are currently focused on computer optics, image processing, pattern recognition, and control systems. E-mail: smirnov.s.a@rsreu.ru.

Received July 22, 2019. The final version – October 11, 2019.
